

УДК 621.923

## НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Якимов А.В., докт. техн. наук, Новиков Г.В., канд. техн. наук  
(г. Харьков, г. Одесса)

*Теоретически определены наиболее эффективные направления повышения производительности механической обработки металлов.*

В настоящее время накоплен большой опыт по осуществлению высокопроизводительной обработки металлов резанием, разработаны эффективные процессы резания и конструкции режущих инструментов. Однако высокие

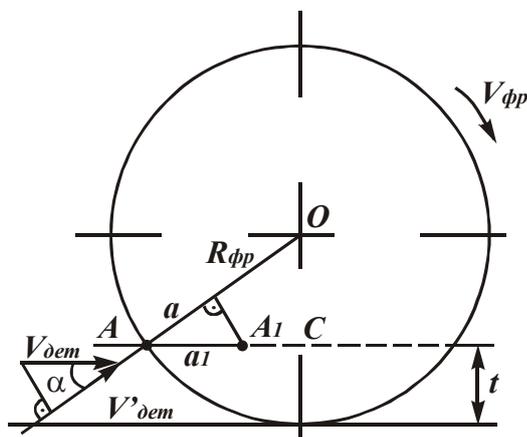


Рис.1. Расчетная схема фрезерования.

требования к созданию конкурентоспособной машиностроительной продукции требуют постоянного решения задач по повышению производительности, качества, точности и экономичности металлообработки. Что бы системно подойти к выработке правильных решений по выявлению новых резервов механической обработки, в настоящей работе приведены аналитические зависимости для расчета производительности различных процессов резания и проведен их анализ.

Одним из путей повышения эффективности обработки следует рассматривать изменение кинематики резания за счет применения многолезвийных инструментов (фрез и т.д.). Исходя из расчетной схемы фрезерования цилиндрической фрезой (рис. 1), определим толщину среза  $a$ . Расстояние между двумя соседними зубьями  $l$  фреза проходит за время  $T=l/V_{фр}$ , где  $V_{фр}$ - скорость вращения фрезы, м/с. За это время точка А, расположенная на обрабатываемой поверхности, пройдет путь  $a^l$  и переместиться в положение  $A^l$ . Проекция отрезка  $AA^l = a^l$  на линию, проведенную через точки А и О, определяет толщину среза  $a$ . Тогда

$$a = V_{дет}^l \cdot T, \quad (1)$$

где  $V_{дет}^l = V_{дет} \cdot \cos \alpha$ ;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $\alpha$  – угол между скоростью детали  $V_{дет}$  и её проекцией  $V_{дет}^l$ .

Окончательно получим

$$a = l \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{фр}}}, \quad (2)$$

где  $R_{фр}$  – радиус фрезы, м,  $t$  – глубина резания, м.

Как видим, толщина среза  $a$  тем меньше, чем меньше расстояние между зубьями фрезы  $l$ , глубина резания  $t$ , скорость детали  $V_{дет}$  и больше скорости фрезы  $V_{фр}$  и радиуса фрезы  $R_{фр}$ . Производительность фрезерования  $Q$  опишем зависимостью

$$Q = V_{дет} \cdot t \cdot B, \quad (3)$$

где  $B$  – ширина фрезерования, м.

Разрешим зависимость (2) относительно  $t$

$$t = \left( \frac{a}{e} \cdot \frac{V_{фр}}{V_{дет}} \right)^2 \cdot \frac{R_{фр}}{2}. \quad (4)$$

Подставим (4) в зависимость (3)

$$Q = \left( \frac{a}{e} \cdot V_{фр} \right)^2 \cdot \frac{R_{фр}}{2 \cdot V_{дет}} \cdot B. \quad (5)$$

Увеличить  $Q$  можно увеличением параметров  $a$ ,  $V_{фр}$ ,  $R_{фр}$ ,  $B$  и уменьшением  $V_{дет}$  и  $l$ . Увеличение толщины среза  $a$  ограничено прочностью зубьев фрезы, поэтому в зависимости (5) параметр  $a$  следует рассматривать постоянным (заданным).

Уменьшение параметра  $V_{дет}$  возможно до значения, при котором глубина резания  $t$ , исходя из зависимости (4), становится равной радиусу фрезы  $R_{фр}$ . Следовательно, наибольшая производительность обработки  $Q$  достигается при  $t=2R_{фр}$ . Данные условия на практике реализовано в схеме фрезерования торцевой фрезой, т.е. торцовое фрезерование следует рассматривать как наиболее производительный способ механической обработки. При этом, чем больше диаметр фрезы  $2R_{фр}$  и величина снимаемого припуска равная  $B$ , тем больше производительность обработки  $Q$ .

Сравним производительности обработки при фрезеровании и точении. Предположим, что производительность процесса точения определяется по зависимости

$$Q_t = V_{рез} \cdot a \cdot B, \quad (6)$$

где  $V_{рез}$  – скорость резания, м/с.

С учетом (6) представим зависимость (5) в виде

$$Q = Q_t \cdot \left(\frac{V_{фр}}{l}\right)^2 \cdot \frac{a \cdot R_{фр}}{2 \cdot V_{дем} \cdot V_{рез}}. \quad (7)$$

Здесь  $V_{дем}$  – скорость детали при фрезеровании.

Расстояние между зубьями фрезы  $l$  выразим

$$l = \frac{2\pi \cdot R_{фр}}{z}, \quad (8)$$

где  $z$  – число зубьев фрезы.

Подставляя (8) в (7), окончательно получим

$$Q = Q_t \cdot \frac{V_{фр}^2}{V_{дем} \cdot V_{рез}} \cdot \frac{a \cdot z^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot R_{фр}}. \quad (9)$$

Условие  $Q > Q_t$  выполняется при

$$\frac{V_{фр}^2}{V_{дем} \cdot V_{рез}} \cdot \frac{a \cdot z^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot R_{фр}} > 1,$$

или

$$z > \sqrt{\frac{V_{дем} \cdot V_{рез} \cdot 8 \cdot \pi^2 \cdot R_{фр}}{V_{фр}^2 \cdot a \cdot z^2}}. \quad (10)$$

Например, при  $V_{рез}/V_{фр} = 1$ ,  $V_{дем}/V_{фр} = 10^{-3}$ ;  $R_{фр} = 100$  мм;  $a = 0,1$  мм, имеем  $z > 9$ , что практически реализуемо. Таким образом, за счет выбора соотношения  $V_{дем}/V_{фр}$  можно всегда выполнить неравенство (10). Это означает, что потенциально процесс фрезерования более производителен. Кроме того, дополнительно увеличить производительность фрезерования можно за счет увеличения  $V_{фр}$ , выполняя условие  $V_{рез}/V_{фр} < 1$ . Физически это возможно, так как при фрезеровании меньше температура нагрева режущих зубьев фрезы в связи с периодичностью процесса резания.

Сравним производительности обработки при фрезеровании и шлифовании. Для этого в зависимости (5) величину  $l$  выразим зависимостью (8):

$$Q = (a \cdot z \cdot V_{фр})^2 \cdot \frac{B}{8 \cdot \pi^2 \cdot V_{дем} \cdot R_{фр}}. \quad (11)$$

Здесь  $V_{фр} = V_{кр}$ ,  $R_{фр} = R_{кр}$  (где  $V_{кр}$  и  $R_{кр}$  – соответственно скорость и радиус шлифования круга);  $B$  – ширина фрезерования, равная ширине шлифования. Если принять, что значения  $V_{фр}$ ,  $R_{фр}$ ,  $B$ ,  $V_{дем}$  одинаковы для процессов фрезерования и шлифования, то производительность обработки будет определяться произведением параметров  $a \cdot z$ . Для шлифовального круга параметр  $a$  меньше, а параметр  $z$  больше, чем для фрезы.

Предельная толщина среза режущим зерном круга в 100...1000 раз меньше предельной толщины среза зубом фрезы. Следовательно, для того чтобы производительности процессов шлифования и фрезерования были сопоставимы, необходимо чтобы число режущих зерен круга превышало в такое же число раз число режущих зубьев фрезы.

Расчет производительности шлифования произведем, используя расчетную схему, согласно которой режущие зерна на рабочей поверхности круга расположены условно вдоль диаметральных окружностей. Расстояние между окружностями примем равным  $2a$ , а расстояние между зернами в пределах одной окружности – равным  $l$ . Тогда  $l = 2\pi \cdot R_{кр}/z$ , где  $z$  – число зерен, расположенных в пределах одной окружности. Величина  $z$  равна

$$z = \frac{n_0}{n_1}, \quad (12)$$

где  $n_0$  – общее число зерен, расположенных на рабочей поверхности круга;

$n_1 = B/2a$  – число окружностей на рабочей поверхности круга, удаленных друг от друга на величину  $2a$ ;

$B$  – ширина круга, м;

$a$  – толщина среза, м.

Параметр  $n_0$  представим

$$n_0 = k \cdot B \cdot 2\pi \cdot R_{кр}, \quad (13)$$

где  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>.

Параметр  $k$  может быть рассчитан по известной формуле проф. Резникова А.Н.

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - E)}{200 \cdot \pi \cdot X^2}, \quad (14)$$

где  $m$  – объемная концентрация зерен в алмазном круге;

$X$  – зернистость круга, м;

$(1 - E)$  – безразмерный коэффициент, учитывающий высоту выступания зерен над уровнем связки круга.

В расчетах коэффициент  $(1 - E)$  можно принять в виде

$$(1 - E) = \frac{a}{X}. \quad (15)$$

Тогда параметры  $k$  и  $z$  опишутся

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot a}{200 \cdot \pi \cdot X^3}, \quad (16)$$

$$z = \frac{3 \cdot m \cdot a^2 \cdot R_{кр}}{50 \cdot X^3}. \quad (17)$$

Соответственно расстояние между зернами в пределах одной условной диаметральной окружности  $l$  выразится

$$l = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{кр} \cdot 100 \cdot \pi \cdot X^3}{z \cdot 3m \cdot a^2}. \quad (18)$$

Подставим (18) в зависимость (2), рассматривая в ней  $V_{фр} = V_{кр}$ ,  $R_{фр} = R_{кр}$ . После преобразований, имеем

$$a = X \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot \pi}{3m} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр}}}}. \quad (19)$$

Таким образом, получена расчетная зависимость для определения толщины среза при шлифовании, которая практически идентична аналогичным зависимостям, установленным нами на основе других расчетных схем [1].

Отличие зависимостей состоит лишь в численном значении множителя, стоящим под радикалом.

Производительность шлифования  $Q$  определим из зависимости (5) с учетом (18), рассматривая  $a = \text{const}$ ,  $V_{фр} = V_{кр}$ ,  $R_{фр} = R_{кр}$ :

$$Q = \left( \frac{3 \cdot m \cdot a^3}{100 \cdot \pi \cdot X^3} \cdot V_{кр} \right)^2 \cdot \frac{R_{кр} \cdot B}{2 \cdot V_{дем}}. \quad (20)$$

Как видим, наибольшее влияние на  $Q$  оказывает толщина среза  $a$ , т.е. производительность обработки обусловлена главным образом прочностью режущих зерен и прочностью удержания их в связке круга.

Исходя из зависимости (5), справедливой для процессов шлифования и фрезерования, отличие производительности для двух процессов связано с соотношением  $a/l$ . Для шлифования

$$\frac{a}{l} = \frac{3m \cdot a^3}{100 \cdot \pi \cdot X^3}. \quad (21)$$

Для исходных данных:  $m = 100$ ;  $a = 0,01$  мм;  $X = 0,1$  мм, имеем  $a/l = 0,001$ .

Для фрезерования примем:  $a = 0,1$  мм,  $l = 10$  мм. Тогда  $a/l = 0,01$ .

Следовательно, при шлифовании соотношение  $a/l$  меньше, чем при фрезеровании. Соответственно меньше производительность обработки. Из зависимости (21) следует, что соотношение  $a/l$  существенно зависит от  $a/X$ , т.е. незначительное изменение  $a/X$  ведет к значительному изменению соотношения  $a/l$ . Например, увеличение отношения  $a/X$  в два раза приведет к увеличению  $a/l$  в 8 раз. В этом случае значения  $a/l$  для шлифования и фрезерования станут примерно одинаковыми. Таким образом показано, что процессы шлифования и фрезерования по производительности (при определенных условиях) сопоставимы. Основным направлением увеличения производительности шлифования следует рассматривать применение алмазных кругов на прочных металлических связках, обеспечивающих повышение значения отношения  $a/X$ . Эффективно также применение глубинного однопроходного шлифования с относительно небольшой скоростью детали  $V_{дем}$ .

Важнейшим условием повышения производительности как шлифования, так и фрезерования, исходя из зависимости (5), является увеличение скорости вращения круга (фрезы), т.е. переход в область высокоскоростной обработки. Это весьма эффективно, так как скорость резания  $V_{фр}$  входит в зависимость (5) во второй степени. Собственно этим объясняется перспективность создания фрезерных и шлифовальных станков для высокоскоростной обработки. При резании однолезвийным инструментом (при точении, строгании, растачивании) производительность обработки, определяемая зависимостью (6), в меньшей мере зависит от скорости резания, т.е. эффект применения высокоскоростной обработки ниже.

Сравнивая зависимости (5) и (6) нетрудно видеть, что при резании многолезвийными инструментами значительно больше возможностей увеличения производительности обработки, так как зависимость (5) содержит значительно больше параметров, чем зависимость (6). Если при резании однолезвийным инструментом производительность обработки определяется лишь 3-я параметрами, то при резании многолезвийным инструментом – 6-ю параметрами. Существенно уменьшая параметры  $l$  и  $V_{дем}$ , можно добиться существенного увеличения производительности обработки при резании многолезвийным инструментом. Таким образом, теоретически обоснованы потенциальные возможности процессов резания с точки зрения увеличения производительности обработки.

#### Литература

1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие/ А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450с.